

通行量の分析と予測

The Analysis and the Forecasting of Traffic Volume

上 野 皓 司
Ueno, Koji

ABSTRACT

The traffic volume should be estimated or forecasted to improve and construct the road. The method of estimation and forecasting of traffic volume are discussed. Following the assumed set of road system, the flows of cars on the road are pursued and the estimated values at fixed place are calculated. By the difference of error of estimation the calculated values are widely dispersed. The samples of estimated value are exhibited.

道路の利用率は道路交通の需要量を表しているが、既存の道路網に新たな道路が新設されたり、既存の道路の一部が拡幅や改善された時には、それぞれの道路の利用率が大きく変化することがある。利用者が費用や時間の低減を求めて新たなルートを設定するからである。貨物の集配やバスによる乗客の乗降等の最適ルートの選択は車両ルート問題 (VRP=vehicle routing problem) として、研究され続けている。車両ルート問題は、等しい需要に対してルートを最短にする問題、一定の貨物や人の輸送を再短時間で実施する問題、需要が不確定なときの静学的や動学的な問題、等が検討されているが、Bertsimas and Simchi-Levi (1996) は、ルートの選択により、米国では 1990 年に 1000 億ドル以上の輸送コストが削減されたと説明しており、最適ルートの選択とそれに対応した交通需要の推定、より安価なルートの設定は今後の重要な研究課題である。

通行量の年間変化率やルートを取り囲む全般的な交通需要の長期的な動向は所得水準や経済活動の動向、燃料価格、公共交通機関の料金、等によって影響さ

れる。また高速道路では利用料によって短期的にも変化が生じる。例えば Button (1993) は、バス、地下鉄、鉄道の料金変化が相互に及ぼす効果や、貨物料金が各種の商品に及ぼす輸送需要の変化、各国の航空需要への所得や料金の影響等を分析している⁽¹⁾。

交通需要の予測は各方面から検討されているが、米国のモデル分析として知られている四段階推定法では、生成交通量を基礎に、①各ゾーンからの発生交通量と各ゾーンへの集中交通量、②各ゾーンから他のゾーンへの発生交通量を分割した分布交通量、③分布交通量を交通機関別に分割した交通機関分担交通量、④交通機関別の分担交通量をルート別に割りつけた配分交通量、の順に段階的に予測を行っている。以下の分析との関連では道路のルートごとの配分交通量が問題になる⁽²⁾。

Schneider (1985) は近年の鉄道、自動車、船舶、パイプライン等の相互の激しい輸送競争に対し、経営者は、①どのような輸送サービスが必要か、②いかにしてこれらのサービスが供給されるべきか、③これらの輸送戦略のためにどのような物が必要で、それらがいかに管理されるべきか、の三つの鍵的な質問に答えなければならない、と述べているが、道路を建設し、管理する側も、ルートの維持や改善について同様な質問を考慮し、通行量に対応した施策を実施しなければならない。

交通需要については上記のような多様な検討課題を有しているが、以下では特定道路の車の通行量に着目し、その予測方法について検討する。

ここでは次のような状況を想定する。A から F まで東西に走る片側1車線、両側で2車線の直線道路があり、A が西側の出発地、F が東側の目的地であり、この道路に同じ片側1車線、両側で2車線の南北の直線道路が西側から順に B, C, D, E 地点で交差している。これらの道路の各地名を A から N で、通行量の観測

(1) Button (1993), 第3章参照。

(2) これらについては、例えば、森地茂・山形耕一 (1993), 115-33 頁, 鈴木道雄 (1991), 103-18 頁, Werner (1985), 18-39 等を参照。

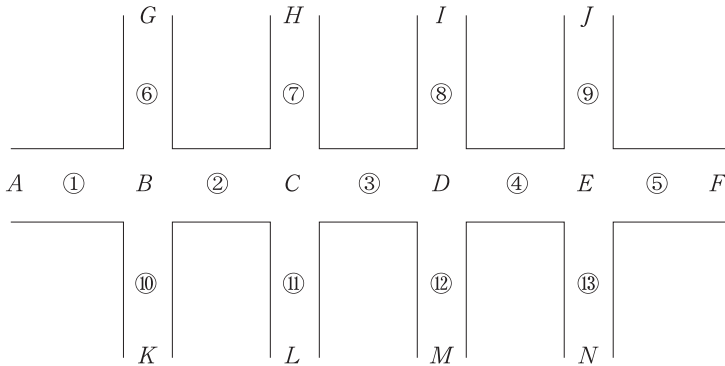


図 1 観測地点

地点を①から⑬で表せば、地名や観測地点は図 1 のように示される。

車は左側を通行する。①では北側車線を走る F 方向すなわち東方面への流れと、南側車線を走る A 方向すなわち西方面への流れとの二つの流れがあり、各観測地点①から⑬ではそれぞれ二つの流れが測定される。また各交差点 B, C, D, E では信号規制のもとで流れの方向が決められる。

A から F 方向への流れのみに注目すれば、②, ③, ④, ⑤での通行量は、 B, C, D, E の信号に規制された時間差を伴う AF 間の東方向への直進的な流れに、 B, C, D, E の交差点での南北への流出と南北からの流入の差し引きが追加される。

A から F への道路上での車の通行量は絶えず変化しており、①から⑤の通行量を厳密に測定すれば同じ時刻でも日、曜日、月等によって差異が生じる。しかし信号交代時間の適正化や道路幅員の拡張等のためには、サンプル的な時刻、曜日、月等の①から⑤の通行量を大まかに把握する必要がある。以下ではこの①から⑤の通行量の推定や予測の方法を考える。

1. 通行量推定の方法

①から⑤の通行量は絶えず変化しているためにもしこれらの地点の通行量を把握しようとすれば常時観測者を置かなければならない。しかし現実には経費面から不可能であり、①から⑬のある時点の実測値を得て他の時点の値を推定

する必要がある。また時間の経過による通行量の推移もサンプル的な実測値の推移から推定する以外にはない。以下ではこのようなサンプル値による推定の方法を考える。

1-1. 同じ時点の値の推定

1990年1月1日の正午12時00分から13時00分までの1時間の①から③のすべての地点での両側2車線の通行量を観測する。この観測により各地点の通行量の絶対量と相対的比率が知られる。これらの値をもとに最も単純に1991年1月1日の正午12時00分から13時00分までの1時間の①から③のすべての地点の値を推定するためには、1991年1月1日の正午12時00分から13時00分までに①から③のなかから一つの地点を観測し、1990年との比率を他のすべての地点に乘じる方法が考えられる⁽³⁾。①の通行量が2倍であれば他も同様に2倍と推定する方法である。とりあえずこの方法を「同時点推定の第一方法」と名付ける⁽⁴⁾。

それでももし1991年に①と⑤の2地点を観測すれば①では2倍⑤では3倍であれば、他をどのように推定すればよいであろうか。同じ問題が他の地点での観測比率が異なる場合に生じる。現実にはすべての地点で観測値の比率が異なると考えられる。異なる年の同じ月日の同じ時間帯に再度すべての地点の比率を測定すれば異なる年の間の地点ごとの比率の一般的な変化が憶測され、例えば1990年2月1日と1991年2月1日の同じ時間帯の変化の指標として利用することが考えられる。1990年2月1日12時00分から13時00分までの①から

(3) 道路のある地点を一定時間内に通行する車の数が交通量(traffic volume)であるが、この交通量を1時間当たりに換算した値は一般に交通流率(rate of flow)と呼ばれる。1年間の交通量の1日の平均値が年平均日交通量(annual average daily traffic)であり、年々の変化の指標であるが、他に季節、月、曜日、日、時間等の変化が検討される。福田正(1994), 42-46 頁参照。

(4) この方法は1991年1月1日の正午12時00分から13時00分までに①から③のすべてを観測し、1990年1月1日の正午12時00分から13時00分までに観測した①の1地点の値から1990年1月1日の他の②から③の値を推定するさいにも適用できる。以下では「推定」という用語は現在と同時に過去の値の憶測にも使用する。

③の通行量が測定されていれば、各地点に1990年1月1日から1年間の変化率を乗じ、1991年2月1日の全地域の値を推定することができる。このような方法は「同時点推定の第二方法」とでも呼ぶことができる⁽⁵⁾。

それでは1991年2月1日の値を各地点で観測すればどうであろうか。おそらく1月1日の変化率とは異なっていると考えられる。季節等による通行量の年間の変化によって全般的な差異が生じると考えられるからである。このような状況を考慮すれば、1990年と1991年の各月の同じ日と同じ時間帯の変化率を観測し、これらの変化率を1990年に観測した毎月の複数の値に乘じることによって、1991年の各月の複数の値を推定することができる。このような方法は「同時点推定の第三方法」とでも呼ぶことができる。

以上のような一定期間の観測値を比較し、他の観測していない時点の値を推定する方法は、直感的には明確であり、計測も容易である。上記では1年間と13地点を例示したが、異なる期間や地点数についても同様な方法が適用可能である⁽⁶⁾。

1-2. 流れによる推定

通行量は現実には時間的、場所的に連続する流れであるために、より具体的に推定しようとするれば、場所と時間の流れを考慮した方法が考えられなければならない。以下では交差点での信号規制や渋滞等による地点間の速度の変化は考

(5) 米国の国内輸送統計によれば、自家用車については都市の車両マイル数 (VM=Vehicle-Miles) は1978年に6860億、1988年は9120億、乗客マイル数 (PM=Passenger-Miles) は全体で1978年に2兆1780億、1988年には2兆4300億であり、バスについては、都市間の収入乗客マイル数 (RPM=Revenue-Passenger-Miles) は1978年に2600万、1988年は2300万、地方の収入車両マイル数 (RVM=Revenue-Vehicle-Miles) は1978年に16億3100万、1988年は18億6600万である。また各国の1976年から1990年の資料から、自家用車や他の交通手段に支出する家計費の割合は、オーストラリア9.4%、カナダ13.8%、スウェーデン13.4%、イギリス17.7%、オランダ12.2%、スイス10.5%、米国12.6%である。Berechman (1993) はこれらの資料等を使用して、交通需要全般に対する所得弾力性や自家用車所有弾力性を計算し、マクロ的な交通量の測定方法を検討している。

(6) 簡便な推定方法であるために期間の長さや地点間の距離を適宜考慮しなければならない。一般に極度に短い期間や遠く離れている地点には適用が困難である。

慮せず、各地点を結ぶ車の速度は常に一定である、という仮定のもとで推定の方法を考⁽⁷⁾える。

通行量のある時間の範囲内で測定するために、地点間の距離を d_{ij} 、地点間の平均速度を分速で a_{ij} 、一定時間内に各地点を流れる車の量を λ_{ik} と表示する。 i と j は ①から⑬の地点番号を、 k は 2 車線のいずれかを表している。ここでは左側通行を仮定し、 A から F の東西道路では北側車線を 1、南側車線を 2、南北道路では西側車線を 1、東側車線を 2 と仮定し、 k は東西道路では北側車線が 1 南側車線が 2、南北道路では西側車線が 1 東側車線が 2 を表す。観測時間を ξ と表し、例えば ξ を 20 分間とすれば、20 分間に流れる一団の通行量を考⁽⁸⁾える。1 日の時間帯の順序を T と表せば、例えば 0 時 00 分から 20 分が 1、0 時 20 分から 20 分が 2 と表され、それぞれの時間帯の地点間の平均速度は $a_{ij}(T)$ 、一定時間内に各地点を流れる車の量は $\lambda_{ik}(T)$ と表される。

A から F に向かって東に直進する流れに着目する。 $\xi = 20$ であれば、①の北側車線の 0 時 00 分から 20 分間の流れは $\lambda_{11}(1)$ 、⑥の東側車線の 0 時 00 分から 20 分間の流れは $\lambda_{62}(1)$ 、⑩の西側車線の 0 時 00 分から 20 分間の流れは $\lambda_{101}(1)$ であるが、これらの通行量の一部が一定時間後に②の北側車線を通過する。各地点 i のそれぞれの車線 k から j 地点の k 車線への流れの割合を $\mu_{ik,jk}(T)$ と表せば、時間帯 $T = 1$ の①、⑥、⑩から②への流れの合計は

$$\mu_{11,21}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{101,21}(1) \lambda_{101}(1) \quad (1)$$

と表される。この $\mu_{ik,jk}(T)$ は時間帯 T に i 地点を通過する車の流れの方向の指定値で、時間帯 T によって変化する。①から②の距離が $d_{12} = 1$ km、平均速度が分速で $a_{12} = 500$ m であれば、①から②の所要時間は $1000/500 = 2$ 分であり、2 分の遅れで①の北側の流れが②の北側に達する。もし⑥から②の距離が $d_{62} = 2$ km、

(7) 信号やある時間帯の渋滞等による特定場所の速度の変化は、場所や時間による速度の変化を想定することによって推定に反映させることができる。しかしここでは一般的な方法を検討するために、地点間では同じ平均速度を仮定する。

(8) 20 分間であれば一般に 2 から 3 分の信号の交代による流れの断続を平均的に包含することができる。

平均速度が分速で $a_{12} = 400 \text{ m}$ であれば、⑥から②の所要時間は $2000/400 = 5$ 分であり、5 分の遅れで⑥の東側の流れが②の北側に達するが、⑥の流れは①の流れに 3 分遅れて②に達する。⁽⁹⁾

2. 東西道路の通行量の推定

$B C D E$ の交差点での適正な信号の交代時間の設定や、道路幅員の決定のためには①から⑬の流れの相互関係が把握される必要があるが、 A から F 方向への流れのみに着目すれば、①②③④⑤の月日や時間帯の通行量を知らなければならぬ。 A から F 方向への流れでは、②は①⑥⑩から、③は②⑦⑪から、④は③⑧⑫から、⑤は④⑨⑬から流れが発生するために、 $B C D E$ の交差点を中心とする 4 種類の流れの関係が把握されなければならない。 A から F への流れでは⑥⑦⑧⑨の北側と⑩⑪⑫⑬の南側の 8 ヲ所の流入と流出があるために、これらの地点での流入と流出の差により①②③④⑤の流れの増減が決められる。⁽¹⁰⁾

2-1. 観測地点の設定

観測地点の設定は任意であり、流れを的確に把握できる場所を選べばよいが、ここではまず②は①⑥⑩から、③は②⑦⑪から、④は③⑧⑫から、⑤は④⑨⑬からそれぞれ距離を平均速度で除した値が同一になる地点を選ぶ。この選択のも

(9) 通行量は歩行者や自転車、自動車の流れであり、交通流として理論的、実証的に研究されている。ここでは具体的な流れの把握を考え、実証的な調査の方法を検討しているが、流れの基本的な姿を把握するさいには理論的な研究が必要である。理論的な研究は決定論的研究と確率論的研究の二種類に分けられる。この点については例えば、越正毅・明神証 (1989) 第三章参照。

(10) Westbrook and Buckley (1990) は米国で 1980 年に実施された、鉄道やトラック産業を規制する州間商業委員会 (ICC=Interstate Commerce Commission) の権限の多くを廃止したスタガー鉄道法 (Staggers Rail Act) と自動車運送法 (Motor Carrier Act) の通過を検証し、これらにより米国西部の生産地からシカゴやニューヨークの配送センターへ送られる新鮮な果物や野菜の鉄道や自動車による輸送競争が激化し、続く同様な法案の成立を支持している、と述べている。個人の通勤や買い物による通行量は交通機関相互の競争や周辺経済の変化に比較的影響されることが少ないが、貨物車両の通行量はこれらに大きく影響されるために、長期的な予測には全般的な変化を十分に考慮しなければならない。

とでは②は①⑥⑩から、③は②⑦⑪から、④は③⑧⑫から、⑤は④⑨⑬からそれぞれ同じ時間帯の流れが一定時間の後に同時に流れ込む。このような観測地点をここでは「同時流入地点」と呼んでおく。

「同時流入地点」は極端な場合は②③④⑤へ流入する他の3地点からのそれぞれの到達必要時間がすべて同じこともあるが、一般にはまれであり、異なる所要時間を想定する。また以下では分析の中心になる①②③④⑤の地点を「東西測定拠点」と名付け、 A から N を結ぶ領域ではこの東西道路が幹線であるとする。

2-2. 東西測定拠点の相互関係

0 時 00 分から一定時間 ξ 分間①⑥⑩で測定した通行量の一部は一定時間 α 分の後に②に到着する。この 0 時 00 分から一定時間 α 分後に②に到着する流れの合計 $\lambda_{21}(1+\alpha)$ は上記 (1) から

$$\lambda_{21}(1+\alpha) = \mu_{11,21}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{101,21}(1) \lambda_{101}(1) \quad (2)$$

と表される。 $1+\alpha$ は 0 時 00 分から α 分遅れて一定時間 ξ 分間測定した通行量を表し、 $T=2$ は 0 時 00 分から ξ 分間経過した後に出発する第 2 の測定時間帯を表している。もし $\xi=20$ 分であれば、第 2 の時間帯は 0 時 20 分から 0 時 40 分である。同様に②⑦⑪から③に β 分遅れて到着する一定時間 ξ 分間の通行量の合計 $\lambda_{31}(1+\beta)$ は

$$\lambda_{31}(1+\beta) = \mu_{21,31}(1) \lambda_{21}(1) + \mu_{72,31}(1) \lambda_{72}(1) + \mu_{111,31}(1) \lambda_{111}(1), \quad (3)$$

③⑧⑫から④に γ 分遅れて到着する一定時間 ξ 分間の通行量の合計 $\lambda_{41}(1+\gamma)$ は

$$\lambda_{41}(1+\gamma) = \mu_{31,41}(1) \lambda_{31}(1) + \mu_{82,41}(1) \lambda_{82}(1) + \mu_{121,41}(1) \lambda_{121}(1), \quad (4)$$

④⑨⑬から⑤に δ 分遅れて到着する一定時間 ξ 分間の通行量の合計 $\lambda_{51}(1+\delta)$ は

$$\lambda_{51}(1+\gamma) = \mu_{41,51}(1) \lambda_{41}(1) + \mu_{92,51}(1) \lambda_{92}(1) + \mu_{131,51}(1) \lambda_{131}(1) \quad (5)$$

と表される。

②の北側の通行量は①の北側以外に⑥の東側と⑩の西側の通行量によって決

(11) 正確には 0 時 40 分には第 3 の時間帯が出発し、0 時 40 分の直前に第 2 の時間帯が終わっている。

められるが、もし①の北側から G や K へ、⑥の東側から A や K へ、⑩の西側から A や G へ、それぞれの流出が少なければ、②の北側の通行量は①の北側より増大する。同様なことが③④⑤の北側についてもいえ、東西が幹線で朝の通勤の流れがセンターシティである F 方向に流れるときなどには①から⑤に向かって北側の流れが増大する。極端な場合には①の北側から G と K への流出がなく⑥の東側と⑩の西側の流れがすべて②の北側に達することがある。このようなさいには①の北側、⑥の東側、⑩の西側の3地点の推定が②の北側の流れを推定することと同じであり、同様な状況が交差点 C で生じればさらに⑦の東側、⑩の西側を推定すれば時間的に連続する③の北側の推定値が得られる。

上記の関連より②の通行量は①⑥⑩の通行量とそれぞれの地点から②へ進む割合の把握によって知られるが、このような①⑥⑩の把握から α 分後の②の流れを順次測定してゆく方法をここでは「後続測定法」と名付け、この方法について検討する。

この方法では先行する地点の $\lambda_{ik}(T)$ とそれらの地点から後続する地点への流れの割合 $\mu_{ik,jk}(T)$ がまず把握されなければならない。先行する地点の通行量は実測値である場合と推定値である場合の両者があるが、それらの地点から後続する地点への流れの割合は通常実測が困難であり、 $\mu_{ik,jk}^{(12)}(1)$ は推定される必要がある。 $\lambda_{ik}(T)$ の推定は先行する地点から後続的に測定される場合と、独自に推定される場合とがあるが、前者は以下の推定方法の検討対象であり、後者は外部的に独立に推定されるために、まず $\mu_{ik,jk}(T)$ の推定方法を考える。

2-3. 交差点での流れの分岐

①⑥②⑩の交差点 B での相互の流れの関連を考える。 $T=1$ ではつぎのような関連が存在する。まず通行量については

$$\lambda_{12}(1+\alpha) = \mu_{62,12}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{22,12}(1) \lambda_{22}(1) + \mu_{101,12}(1) \lambda_{101}(1), \quad (6)$$

$$\lambda_{61}(1+\alpha) = \mu_{11,61}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{22,61}(1) \lambda_{22}(1) + \mu_{101,61}(1) \lambda_{101}(1), \quad (7)$$

(12) 交差点で目視できるが、正確な値の把握は困難である。

$$\lambda_{21}(1+\alpha) = \mu_{11,21}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{101,21}(1) \lambda_{101}(1), \quad (2)$$

$$\lambda_{102}(1+\alpha) = \mu_{11,102}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,102}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{22,102}(1) \lambda_{22}(1), \quad (8)$$

の関連が、同じ地点からの流出についての係数の間には、

$$\mu_{11,61}(1) + \mu_{11,21}(1) + \mu_{11,102}(1) = 1, \quad (9)$$

$$\mu_{62,12}(1) + \mu_{62,21}(1) + \mu_{62,102}(1) = 1, \quad (10)$$

$$\mu_{22,12}(1) + \mu_{22,61}(1) + \mu_{22,102}(1) = 1, \quad (11)$$

$$\mu_{101,12}(1) + \mu_{101,61}(1) + \mu_{101,21}(1) = 1, \quad (12)$$

の関連が存在する。

ここでもしある一定時間内では同じ流れが生じているとすれば、すなわち一定時間 ω 分の範囲内では交差点 B を経由する①⑥②⑩の相互の流れが不変であり、例えば $\xi (< \omega)$ 分内の通行量が α 分後にそれぞれに分かれて流れてゆく量が不変であれば、 $\lambda_{ik}(1+\alpha) = \lambda_{ik}(1)$ であり、各地点の観測値と分岐の方向の関連を判断する材料が提供されたことになる。

しかし各車線から左折、右折、直進の3方向へ移動することができる場合は $\mu_{ik,jk}$ の未知数が全部で12個になり、上記の方程式は8個であるために、8個の λ_{ik} の観測値が与えられても12個の $\mu_{ik,jk}$ を決定することはできない。したがってこのような3方向へ移動可能な交差点では、信号の交代に対応して各車線から3方向へどのような割合で分かれて行くかを目視で観測する必要が生じ、交差点での観測のサンプルにしたがってそれぞれの時間帯の $\mu_{ik,jk}$ を決めることになる。

それでは左折と直進しかできない交差点ではどうであろうか。このとき B の交差点では通行量については、

$$\lambda_{12}(1+\alpha) = \mu_{22,12}(1) \lambda_{22}(1) + \mu_{101,12}(1) \lambda_{101}(1), \quad (13)$$

$$\lambda_{61}(1+\alpha) = \mu_{11,61}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{101,61}(1) \lambda_{101}(1), \quad (14)$$

$$\lambda_{21}(1+\alpha) = \mu_{11,21}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1) \lambda_{62}(1), \quad (15)$$

$$\lambda_{102}(1+\alpha) = \mu_{62,102}(1) \lambda_{62}(1) + \mu_{22,102}(1) \lambda_{22}(1), \quad (16)$$

の関連が、同じ地点からの流出についての係数の間には、

$$\mu_{11,61}(1) + \mu_{11,21}(1) = 1, \quad (17)$$

$$\mu_{62,21}(1) + \mu_{62,102}(1) = 1, \quad (18)$$

$$\mu_{22,12}(1) + \mu_{22,102}(1) = 1, \quad (19)$$

$$\mu_{101,12}(1) + \mu_{101,61}(1) = 1, \quad (20)$$

の関連が存在する。この場合には $\mu_{ik,jk}$ の未知数が全部で 8 個であり、上記の方程式が 8 個であるために、8 個の λ_{ik} の観測値が与えられれば $\mu_{ik,jk}$ を決定することができる。すなわち①⑥②⑩の両側車線の通行量を観測すれば、交差点で各車線の進行方向を観測しなくても、その時間帯の分かれて行く方向の割合 $\mu_{ik,jk}$ を求めることができる。

3. 右折できない交差点の流れ

B C D E の交差点がすべて右折できない場合を考える。このとき⑩⑪⑫⑬では東西幹線の F 方向への流れには直接関連はなく北と西への流出と東と北からの流入があるのみである。東西幹線の F 方向への流れは①②③④の北への流出と⑥⑦⑧⑨の流入によって影響を受ける。

3-1. 流れの連鎖

右折禁止のもとでは $T = 1$ に①の北車線と⑥の東車線の通行量は α 分後に②の北車線に達する。すなわち

$$\lambda_{21}(1 + \alpha) = \mu_{11,21}(1) \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1) \lambda_{62}(1), \quad (15)$$

が成立する。ここでは同じ時間帯の別な日に測定された①⑥②の $\mu_{ik,jk}$ の値が利用され、 $\lambda_{11}(1)$ 、 $\lambda_{62}(1)$ についてはその日の時間帯 $T = 1$ の実測値であり、 $\lambda_{21}(1 + \alpha)$ は (15) の右辺から求められると考える。ここでは推定値には★印をつけることにすれば、(15) は

$$\lambda_{21}(1 + \alpha)^{\star} = \mu_{11,21}(1)^{\star} \lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1)^{\star} \lambda_{62}(1), \quad (21)$$

と表される。

東西が幹線で通勤時間帯には F 方向への流れが多く②③④⑤の実測が困難な

ときはさらに⑦⑧⑨を観測して③④⑤の流れを推定する必要がある。ここで(21)によって推定された $\lambda_{21}(1+\alpha)^*$ の値の誤差を e_2 と表す。この e_2 は例えば正規分布に従う。このとき②の推定値と⑦の実測値による③の推定値は

$$\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^* = \mu_{21,31}(1+\alpha)^*(\lambda_{21}(1+\alpha)^* + e_2) + \mu_{72,31}(1+\alpha)^* \lambda_{72}(1+\alpha) \quad (22)$$

である。 $\mu_{21,31}(1+\alpha)^*$, $\mu_{72,31}(1+\alpha)^*$, $\lambda_{21}(1+\alpha)^*$ 等の新たな推定値が加わるために、 $\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^*$ と $\lambda_{21}(1+\alpha)^*$ の誤差の平均値や分散は異なる。したがって $\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^*$ の誤差は e_3 と表すことができる。

同様に③の推定値と⑧の実測値による④の推定値は

$$\begin{aligned} \lambda_{41}(1+\alpha+\beta+\gamma)^* &= \mu_{31,41}(1+\alpha+\beta)^*(\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^* + e_3) \\ &\quad + \mu_{82,41}(1+\alpha+\beta)^* \lambda_{82}(1+\alpha+\beta), \end{aligned} \quad (23)$$

④の推定値と⑨の実測値による⑤の推定値は

$$\begin{aligned} \lambda_{51}(1+\alpha+\beta+\gamma+\delta)^* &= \mu_{41,51}(1+\alpha+\beta+\gamma)^*(\lambda_{41}(1+\alpha+\beta+\gamma)^* + e_4) \\ &\quad + \mu_{92,51}(1+\alpha+\beta+\gamma)^* \lambda_{92}(1+\alpha+\beta+\gamma) \end{aligned} \quad (24)$$

となる。(24)は⑤の北側の0時00分 $+(\alpha+\beta+\gamma+\delta)$ 分から0時20分 $+(\alpha+\beta+\gamma+\delta)$ 分までの通行量は、④の北側の推定通行量と⑨の東側の実測通行量によって測定されることを表している。この⑤の推定値には前の地点から東西道路に分岐する流れの比率 μ の推定誤差が入るために $\lambda_{51}(1+\alpha+\beta+\gamma+\delta)^*$ の平均値の確率はかなり低くなり、分散の範囲が増大する。

3-2. 推定値の誤差の範囲

①から⑤に至る過程で推定値にどれだけ誤差が生じるかを簡単な例によって考えてみる。まず μ の $T=1$ の時間帯のいくつかのサンプルがすべての地点で平均値から5%前後にずれる可能性が高いと仮定する。厳密には μ の分布から平均値の前後にずれる値の確率を計算し、後続する地点の通行量の可能な値をその条件のもとで計算するが、明確化のために前後5%を仮定する。また⑥⑦⑧⑨から東西に分岐する割合は80%、①②③④が直進する割合は90%と仮定する。また①⑥⑦⑧⑨の ξ 分間の実測通行量は①が200台、他はすべて100台である

⁽¹³⁾
とする。

このとき①から②に直進する車の平均値は $200 \times 0.9 = 180$ 台、⑥から②に左折する車の平均値は $100 \times 0.8 = 80$ 台で、②の平均値は 260 台であるが、 μ には前後 5% の誤差が生じるために②の最小値は $200 \times 0.85 + 100 \times 0.75 = 245$ 台、最大値は $200 \times 0.95 + 100 \times 0.85 = 275$ 台である。

③に達する車は、②から直進する車が最小、最大、平均値いずれも 90% の前後に 5% 誤差が生じるために、②から③に達する車の最小値は $245 \times 0.85 = 208$ 台、最大値は $275 \times 0.95 = 261$ 台、平均値は 235 台であり、⁽¹⁴⁾⑦から左折する車は⑥の場合と同様に最小値は $100 \times 0.75 = 75$ 台、最大値は $100 \times 0.85 = 85$ 台、平均値は $100 \times 0.8 = 80$ 台であるために、③の最小値は 283 台、最大値は 346 台、平均値は 315 台である。④に達する車は、③から直進する車が最小、最大、平均値いずれも 90% の前後に 5% 誤差が生じるために、③から④に達する車の最小値は $283 \times 0.85 = 241$ 台、最大値は $346 \times 0.95 = 329$ 台、平均値は 285 台であり、⁽¹⁵⁾⑧から左折する車は⑦の場合と同様に最小値は $100 \times 0.75 = 75$ 台、最大値は $100 \times 0.85 = 85$ 台、平均値は $100 \times 0.8 = 80$ 台であるために、④の最小値は 316 台、最大値は 414 台、平均値は 365 台である。

⑤に達する車は、④から直進する車が最小、最大、平均値いずれも 90% の前後に 5% 誤差が生じるために、最小値は $316 \times 0.85 = 269$ 台、最大値は $414 \times 0.95 = 393$ 台、平均値は 331 台であり、⁽¹⁶⁾⑨から左折する車は⑧の場合と同様に最小値

(13) ここでは各地点のいくつかのデータを基礎に中心値を考えているが、複数地点の値を相互に比較考慮する予測モデルは一般にクロス・セクション モデル (cross-sectional models) と呼ばれている。Howrey (1969) は都市間航空需要について、素朴な重力モデル (gravity models) とクロス・セクション データを使った精巧な抽象的モデルの予測力を比較検討し、重力モデルの良さを説明しているが、近距離の都市内交通については重力モデルの適用が困難であるために、クロス・セクションや時系列 (time series) データの利用が考えられる。

(14) 平均値は $260 \times 0.9 \div 2 = 234$ 台であるが、最小値と最大値の合計を 2 で割れば $(208 + 261) \div 2 = 235$ 台であるために、この値を採用している。最大値と最小値を四捨五入しているために、このような結果が生じている。

(15) 平均値は $314 \times 0.9 \div 2 = 283$ 台であるが、最小値と最大値の合計を 2 で割れば $(241 + 329) \div 2 = 285$ 台であるために、この値を採用している。最大値と最小値を四捨五入しているために、このような結果が生じている。

は $100 \times 0.75 = 75$ 台, 最大値は $100 \times 0.85 = 85$ 台, 平均値は $100 \times 0.8 = 80$ 台であるために, ⑤の最小値は 344 台, 最大値は 478 台, 平均値は 411 台である。

以上の結果をまとめれば以下になる。

左折 平均値 80%, 誤差前後 5%

直進 平均値 90%, 誤差前後 5%

実測通行量 ① 200 台, ⑥⑦⑧⑨ 100 台

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	245 台	283 台	316 台	344 台
平均値	260 台	315 台	365 台	411 台
最大値	275 台	346 台	414 台	478 台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は,

② $\pm 5.77\%$, ③ $\pm 9.84\%$, ④ $\pm 13.42\%$, ⑤ $\pm 16.30\%$,

となり, 進行方向に 5% の誤差が生じれば, ⑤の推定値には平均値の前後に 16.30% の乖離幅が生じる可能性があることがわかる。⁽¹⁷⁾

3-3. 流入量や進行方向の割合の差異による誤差の変化

それでは北側からの流入量が漸次増加してゆくとき誤差はどのように変わるであろうか。進行方向の平均的な割合やその誤差は上記と同じであるが, 流入量が⑥で 100 台, ⑦で 200 台, ⑧で 300 台, ⑨で 400 台の場合を考えれば, 結果は次のようになる。

左折 平均値 80%, 誤差前後 5%

✓ (16) 平均値は $365 \times 0.9 \div 329$ 台であるが, 最小値と最大値の合計を 2 で割れば $(269 + 393) / 2 = 331$ 台であるために, この値を採用している。最大値と最小値を四捨五入しているために, このような結果が生じている。

(17) 産業立地論では一般に原材料や最終生産物の輸送コストが工場や営業所の立地に大きく影響すると考えている。Justman (1994) は最近では輸送コストではなく情報や技術の集積が大きく影響し, これらの集中地区に事業所が多く立地し, 労働需要を生み出していると指摘している。これらの新たな立地や既存事業所の拡大, あるいは逆の現象は雇用の増減を生み, 周辺の交通需要を変化させる。交通需要の予測のさいには十分に考慮しなければならない。

直進 平均値 90%, 誤差前後 5%

実測通行量 ①200 台, ⑥100 台, ⑦200 台, ⑧300 台, ⑨400 台

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	245 台	358 台	529 台	750 台
平均値	260 台	395 台	597 台	861 台
最大値	275 台	431 台	664 台	971 台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は,

② $\pm 5.77\%$, ③ $\pm 9.11\%$, ④ $\pm 11.22\%$, ⑤ $\pm 12.78\%$,

となり, 進行方向に 5%の誤差が生じれば, ⑤の推定値には平均値の前後に 12.78%の乖離幅が生じる可能性がある。この乖離幅は上記の北側からの流入量が一定のときより少なくなっている。直進する量が相対的に少なくなるからである

それでは進行方向の割合が変化し, その誤差が上記と同様に 5%であれば, 推定値はどのように変わるであろうか。直進の平均値は 70%, 左折の平均値が 60%の場合を考えれば, 結果は次のようになる。

左折 平均値 60%, 誤差前後 5%

直進 平均値 70%, 誤差前後 5%

実測通行量 ① 200 台, ⑥⑦⑧⑨ 100 台

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	185 台	175 台	169 台	165 台
平均値	200 台	201 台	202 台	203 台
最大値	215 台	226 台	235 台	241 台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は,

② $\pm 7.50\%$, ③ $\pm 12.44\%$, ④ $\pm 16.34\%$, ⑤ $\pm 18.72\%$,

となり, 進行方向の割合が変化すれば, ⑤の推定値には平均値の前後に 18.72%の乖離幅が生じる。これは第一の例より乖離幅が大きく, 進行方向の割合が低下すれば, 同じ誤差であれば, 通行量の推定値に不確実性が増大することを示している。⁽¹⁸⁾

4. 3方向に分岐するさいの推定値

交差点での目視によれば右折可能な場合でも3方向への分岐の割合を測定することができ、南側からの進入がみられる。右折可能な場合の①②③④⑤の一般的な関連は以下になる。

右折可能なもとでは $T = 1$ に①の北車線と⑥の東車線、⑩の西車線の通行量は α 分後に②の北車線に達する。すなわち

$$\lambda_{21}(1+\alpha) = \mu_{11,21}(1)\lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1)\lambda_{62}(1) + \mu_{101,21}(1)\lambda_{101}(1) \quad (2)$$

が成立するが、ここでは同じ時間帯の別な日に目視によって測定された①⑥⑩の $\mu_{ik,jk}$ の値が利用され、 $\lambda_{11}(1)$ 、 $\lambda_{62}(1)$ 、 $\lambda_{101}(1)$ はその日の時間帯 $T = 1$ の実測値であり、 $\lambda_{21}(1+\alpha)$ は (2) の右辺から求められる。ここで推定値に★印をつければ、(2) は

$$\lambda_{21}(1+\alpha)^{\star} = \mu_{11,21}(1)^{\star}\lambda_{11}(1) + \mu_{62,21}(1)^{\star}\lambda_{62}(1) + \mu_{101,21}(1)^{\star}\lambda_{101}(1) \quad (25)$$

と表される。

東西が幹線で通勤時間帯には F 方向への流れが多く②③④⑤の実測が困難なときはさらに⑦⑧⑨と⑪⑫⑬を観測して③④⑤の流れを推定する必要がある。ここで (25) によって推定された $\lambda_{21}(1+\alpha)^{\star}$ の値の誤差を e_2 と表せば、②の推定値と⑦⑪の実測値による③の推定値は

$$\begin{aligned} \lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^{\star} &= \mu_{21,31}(1+\alpha)^{\star}(\lambda_{21}(1+\alpha)^{\star} + e_2) + \mu_{72,31}(1+\alpha)^{\star}\lambda_{72}(1+\alpha) \\ &\quad + \mu_{111,31}(1)^{\star}\lambda_{111}(1) \end{aligned} \quad (26)$$

である。 $\mu_{21,31}(1+\alpha)^{\star}$ 、 $\mu_{72,31}(1+\alpha)^{\star}$ 、 $\mu_{111,31}(1)^{\star}$ 、 $\mu_{21}(1+\alpha)^{\star}$ 等の新たな推定値が加わるために、 $\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^{\star}$ と $\lambda_{21}(1+\alpha)^{\star}$ の誤差の平均値や分散は異なり、

- ✓ (18) 通行量が発生する要因と強度を分析すれば予測に役立つと考えられる。McFadden (1974) は職種、家族状況、自動車保有、健康状態、就業時間、所得水準、等の通行者の条件、自動車保有コスト、バスの料金や待ち時間、道路事情、駐車場、就業場所までの距離、等の周辺状況等を考慮し、通行者の行動決定要因から通行量の発生を検討している。現実には要因を細部に分割すればするほど分析が困難になるが、居住人口、事業所数、所得水準、等の主要な要因を選択し、発生を検討することは必要であるといえる。

$\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^*$ の誤差を e_3 と表せば、③の推定値と⑧⑫の実測値による④の推定値は

$$\begin{aligned}\lambda_{41}(1+\alpha+\beta+\gamma)^* &= \mu_{31,41}(1+\alpha+\beta)^*(\lambda_{31}(1+\alpha+\beta)^*+e_3) \\ &\quad +\mu_{82,41}(1+\alpha+\beta)^*\lambda_{82}(1+\alpha+\beta) \\ &\quad +\mu_{121,41}(1+\alpha+\beta)^*\lambda_{121}(1+\alpha+\beta),\end{aligned}\tag{27}$$

④の推定値と⑨⑬の実測値による⑤の推定値は

$$\begin{aligned}\lambda_{51}(1+\alpha+\beta+\gamma+\delta)^* &= \mu_{41,51}(1+\alpha+\beta+\gamma)^*(\lambda_{41}(1+\alpha+\beta+\gamma)^*+e_4) \\ &\quad +\mu_{92,51}(1+\alpha+\beta+\gamma)^*\lambda_{92}(1+\alpha+\beta+\gamma) \\ &\quad +\mu_{131,51}(1+\alpha+\beta+\gamma)^*\lambda_{131}(1+\alpha+\beta+\gamma)\end{aligned}\tag{28}$$

となる。(28) は⑤の北側の 0 時 00 分 $+(\alpha+\beta+\gamma+\delta)$ 分から 0 時 20 分 $+(\alpha+\beta+\gamma+\delta)$ 分までの通行量は、④の北側の推定通行量と⑨の東側、⑬の西側の実測通行量によって測定されることを表している。この⑤の推定値には前の地点から東西道路に分岐する流れの比率 μ の推定誤差が入るために $\lambda_{51}(1+\alpha+\beta+\gamma+\delta)^*$ の平均値の確率はかなり低くなり、分散の範囲が増大する⁽¹⁹⁾。

4-1. 右折による推定値への影響

それでは 3 方向へ分岐する割合と実測値が

左折 平均値 60%， 誤差前後 5%

右折 平均値 60%， 誤差前後 5%

直進 平均値 70%， 誤差前後 5%

実測通行量 ① 200 台， ⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬ 100 台

の場合には、推定通行量はどのような値になるであろうか。結果は以下のようになる。

(19) Moses (1960) は産業連関表の分析を応用し、多数地域の多数の財貨がどのように相互に流れ、また相互に代替して行くかを検討しているが、交通流の発生と集中を分野や地域に置き換えれば、ルートを通れる車の量の変化にも同様な視点が考えられる。分野や地域の分割は多様であるが、単なる OD 表の記述とは異なった分析や資料の作成が予想される。

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	240 台	266 台	283 台	294 台
平均値	260 台	303 台	334 台	357 台
最大値	280 台	340 台	385 台	419 台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は、

② $\pm 7.70\%$ 、③ $\pm 12.21\%$ 、④ $\pm 15.27\%$ 、⑤ $\pm 17.37\%$ 、

となり、3方向の場合には、⑤の推定値には平均値の前後に17.37%の乖離幅が生じる。これは右折のみで100台が北側から進入する場合より乖離幅が小さく、進入量が多くなれば、乖離幅が小さくなることを示している。

4-2. 方向係数の誤差の変化による推定値への影響

方向係数 μ の誤差は時間帯や通行量によって変化する。通勤時間帯等には比較的方向は明確であるが、通行量の少ないときや夜間等には進行方向は必ずしも一定ではなく、 μ の誤差はかなり大きくなる。反対にラッシュの中心時間帯には方向は画一的になるために方向係数 μ の誤差はかなり小さくなる。以下では誤差の変化によって推定値がどのように変わるかを計算する。

3方向へ分岐する割合と実測値が

左折 平均値 60%， 誤差前後 10%

右折 平均値 60%， 誤差前後 10%

直進 平均値 70%， 誤差前後 10%

実測通行量 ① 200 台， ⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬ 100 台

の場合は、推定通行量はどのような値になるであろうか。結果は以下のようになる。

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	240 台	268 台	288 台	302 台
平均値	270 台	324 台	366 台	399 台
最大値	300 台	380 台	444 台	495 台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は、

② $\pm 11.11\%$, ③ $\pm 17.28\%$, ④ $\pm 21.31\%$, ⑤ $\pm 24.06\%$,

となり、3方向の場合には、⑤の推定値には平均値の前後に24.06%の乖離幅が生じる。誤差が5%のときに比べ推定値の信頼性はかなり低くなる。

それでは3方向へ分岐する割合と実測値が

左折 平均値 60%, 誤差前後3%

右折 平均値 60%, 誤差前後3%

直進 平均値 70%, 誤差前後3%

実測通行量 ① 200台, ⑥⑦⑧⑨⑩⑪⑫⑬ 100台

の場合は、推定通行量はどのような値になるであろうか。結果は以下のようになる。

推定通行量	②	③	④	⑤
最小値	248台	280台	302台	316台
平均値	260台	303台	333台	354台
最大値	272台	325台	363台	391台

これらの結果から②③④⑤の平均値と最小値や最大値との乖離幅は、

② $\pm 4.62\%$, ③ $\pm 7.26\%$, ④ $\pm 9.01\%$, ⑤ $\pm 10.45\%$

となり、⑤の推定値には平均値の前後に10.45%の乖離幅が生じる。⁽²⁰⁾

参考文献

- Berechman, Joseph, Public Transit Economics and Deregulation Policy, Studies in Regional Science and Urban Economics Vol. 23, North-Holland, 1993.
- Bertsimas, Dimitris J., and Simchi-Levi, David, "A New Generation of Vehicle Routing Research: Robust Algorithms, Addressing Uncertainty," Operations Research, 44 (1996), 286-304.

(20) Quandt and Baumol (1966) は同じ出発点から同じ目的地までいくつかの経路が存在するとき、それぞれの到着時間、移動費用、出発の頻度等が異なれば、旅行者の判断基準によってどのように経路が選択されるかを検討している。道路上のルートで所要時間、燃料費、信号の数や渋滞の状況等で人々がどのように経路を選択するかを検討は、通行量の予測にも必要である。

- Button, Kenneth J., *Transport Economics*, 2nd Edition, Edward Elgar, 1993.
- 福田正, 『交通工学』, 朝倉書店, 1994年。
- Howrey, E. Philip, “On the Choice of Forecasting Models for Air Travel,” *Journal of Regional Science*, 9 (1969), 215-24.
- Justman, Moshe, “The Effect of Local Demand on Industry Location,” *Review of Economics and Statistics*, 76 (1994), 742-53.
- 越正毅・明神証 『道路 (1) - 交通流 - 』, 土木学会編「新体系土木工学」61, 技報堂出版, 1989年。
- McFadden, Daniel, “The Measurement of Urban travel demand,” *Journal of Public Economics*, 3 (1974), 303-28.
- 森地茂・山形耕一編『交通計画』, 土木学会編「新体系土木工学」60, 技報堂出版, 1993 年。
- Moses, Leon N., “A General Equilibrium Model of Production, Interregional Trade, and Location of Industry,” *Review of Economics and Statistics*, 42 (1960), 373-97.
- Quandt, Richard E. and William J. Baumol, “The Demand for Abstract Transport Modes: Theory and Measurement,” *Journal of Regional Science*, 6 (1966), 13-26.
- Schneider, Lewis M., “The New Environment Opens up Opportunities for Managers to Save Money and Increase Efficiency,” *Harvard Business Review*, 63 (1985), 118-26.
- 鈴木道雄編著『道路 (II) - 計画と幾何設計 - 』, 土木学会編「新体系土木工学」62, 技報堂出版, 1991年。
- Werner, Christian, *Spatial Transportation Modeling*, Sage Publications, 1985.
- Westbrook, M. Daniel and Patricia A. Buckley, “Flexible Functional Forms and Regularity: Assessing the Competitive Relationship between Truck and Rail Transportation,” *Review of Economics and Statistics*, 72 (1990), 623-30.